

SENSOR ROUTER OPTIK UNTUK JARINGAN FIBER OPTIK BERBASIS *LIQUID CRYSTAL CELL*

Oleh :

Yamato

Abstrak

Sensor jaringan Fiber Optik saat ini berkembang pesat. Jaringan Fiber Optik banyak digunakan karena sifat dasar Fiber Optik yang tahan terhadap gangguan elektromagnetik dan aman terhadap terhadap atmosfer, selain itu mempunyai bobot yang ringan dan bandwidth yg lebar sebagai media transmisi. Dalam tulisan ini, diusulkan sebuah router optik yang semuanya berbasis *Liquid Crystals*, Polarisasi, dan Polarisasi ruang pada *Beam Splitter*. Implementasi dari perangkat ini dirancang untuk dapat beroperasi dengan cahaya dan telah diuji dengan *Plastic Optical Fiber*. Perangkat ini memiliki *Crosstalk* sebesar 14 dB antara saluran ON dan saluran OFF dan memiliki loss sebesar 11 dB. Waktu rata-rata saat switch yang terukur 100 ms. Perangkat ini juga dapat memeriksa *Power Level Optic* pada masing-masing saluran, apabila terjadi kegagalan dan alarm aktif maka secara otomatis ter-switch ke saluran operasi.

Kata Kunci : *Router Optik, Liquid Crystal Cell, Spliiter, Power Level Optic*

1. PENDAHULUAN

Teknologi jaringan Fiber Optik sedang berkembang pesat, terutama karena didorong oleh tuntutan besarnya lebar Bandwith untuk jaringan data. Situasi ini telah membuat kemajuan yang signifikan terhadap kapasitas dalam sistem serat optik. *Wave-length Division Multiplexing* (WDM) saat ini merupakan salah satu teknologi pilihan untuk membangun jaringan-jaringan optik. Teknik ini juga digunakan untuk *sensor multiplexing* [1], [2]. Jaringan optik memerlukan berbagai perangkat aktif dan pasif untuk konektifitas seperti switching dan routing elemen [3], [4]. elemen switching dan routing ini menggunakan teknologi di luar gerakan mekanismenya [5], melewati *Wavelength Division Multiplexers* [4], Faraday rotator dan komponen plat seperempat gelombang, MEMs [6], ruang filterring dan acoustooptic tunable filters [7], ke router-router berbasis liquid crystal [3], [8]. Penggunaan *Plastic Optical Fiber* (POF) meningkat, POF digunakan dalam sensor serat optik dan sebagai media transmisi jaringan LAN dan otomotif [9],[10].

Dalam tulisan ini, semua router optik menggunakan jaringan sensor optik, yang

bekerja di daerah panjang gelombang yang besar. Perangkat ini terbuat dari nematic

Liquid Crystal (LC) dan komponen optik yang lain yang mempunyai kemampuan untuk beroperasi pada cahaya yang tergantung pada besarnya polarisasi. Implementasi perangkat ini telah diuji dengan *Plastic Optical Fiber* (POF) sebagai media transmisi. POF digunakan karena loss transmisi yang dihasilkan rendah, mudah didapat dengan biaya rendah, memiliki fleksibilitas yang tinggi dan mudah digunakan. Perangkat ini memiliki crosstalk sebesar 14 dB antara saluran ON dan saluran OFF dan memiliki loss sebesar 11 dB. Waktu rata-rata saat switch yang terukur 100 ms. Perangkat ini juga dapat memeriksa power level optik pada masing-masing saluran, apabila terjadi kegagalan dan alarm aktif maka secara otomatis ter switch ke saluran operasi. Jadi akan sangat berguna jika dalam LAN menggunakan POF, misalnya, untuk menghubungkan jaringan utama (ring atau bus) dengan jaringan sekunder untuk tujuan keamanan. aplikasi lain adalah multiplexing waktu dua jaringan sensor optik dan meningkatkan kemampuan jaringan. Di sisi lain, implementasi untuk rentang 1550-nm sangat mudah menggunakan versi komponen yang sama yang bekerja di jaringan Telekomunikasi. Dalam hal tersebut, perangkat ini juga dapat digunakan untuk time multiplexing sebuah panjang gelombang dari spektrum WDM,

mengalikan kapasitas jaringan sensor. Bagian 2 menggambarkan Arsitektur Perangkat. Bagian 3 memberikan analisis Sistem Operasi. Bagian 4 memberikan data eksperimen, pengukuran dan pengujian kelayakan perangkat dan parameter tertentu seperti Optical loss.. Bagian 5 menunjukkan penggunaan router penyusun sensor optik konvensional dan Bagian 6 adalah kesimpulan.

2. ARSITEKTUR PERANGKAT

Perangkat ini memiliki bagian optik dan bagian elektronik. Seperti yang terlihat pada Gambar-1. Perangkat ini terbuat dari dua set lensa, yang pertama *Collimate* untuk input cahaya dan yang kedua lebih difokuskan untuk power optik di salah satu outputnya. Polarisasi dan biaya nematic liquid crystal yang rendah, dengan konsumsi power yang juga rendah, tergantung pada sinyal listrik yang dibangkitkan oleh liquid crystal yang menentukan bentuk pancaran polarisasi. Polarisasi 90° yang membagi Polarization Beam Splitter (PBS) memisahkan sinar optik menjadi 2 bentuk polarisasi orthogonal dengan sudut deviasi 90°. Lensa Output digunakan untuk memfokuskan cahaya output dari PBS sebagai pembagi 90/10 pada masukan POF; 10% output port digunakan untuk memantau daya keluaran dan 90% output port digunakan untuk menghubungkan switch ke link fiber.

a. Liquid Crystals

Liquid Crystals merupakan cairan yang berorientasi dari molekul-molekul yang membentuk sumbu panjang yang letaknya sejajar satu sama lain. Rata-rata sumbu panjang tersebut diwakili oleh satuan vektor yang disebut director. Penggunaan Liquid Crystals berpengaruh langsung pada sistem mekanis, listrik, magnetik dan optik [12].

Pada pembangunan perangkat ini *Liquid Crystals* merupakan gabungan antara dua elektroda transparan. Ruang antara elektroda tersebutlah yang diisi dengan Liquid Crystals. Ketebalan masing-masing lapisan Liquid Crystals sama.

Sifat *Liquid Crystals* yang sangat sensitif terhadap medan listrik, memungkinkan aplikasi ini menggunakan untuk aplikasi teknologi optik. Ada beberapa konfigurasi

LC yang dapat digunakan untuk aplikasi optik. Geometri yang terjadi ketika di kedua permukaan elektroda saling tegak lurus disebut struktur disebut *Twist*. Dalam geometri ini, LC sebagai bahan uniaksial, dimana indeks biasnya dapat diubah dengan menggunakan medan listrik kecil yang diberikan dalam bidang arah yang tegak lurus dari LC director. Biasanya, dua polarisasi tersebut ditempatkan pada kedua elektroda dengan sumbu transmisi yang sejajar dengan LC director. Dua polarizer tersebut ditempatkan pada kedua elektroda dengan sumbu transmisi yang sejajar dengan LC director.

Pengoperasian perangkat twisted nematic berdasarkan sifat waveguiding. Dengan tidak adanya medan listrik yang ditimbulkan, maka vektor polarisasi cahaya tersebut dapat diatur dan akibatnya, struktur berputar seperti vektor dengan sudut 90°. Aturan ini khususnya *Waveguide* (Hukum Mauguin's) terjadi ketika keterlambatan fase memenuhi kondisi sebagai berikut:

$$\frac{\Delta n d}{\lambda} \gg 1$$

Dimana Δn adalah birefringence optik dari bahan LC, d adalah ketebalan lapisan LC dan λ adalah panjang gelombang cahaya.

Di sisi lain, ketika tegangan yang diberikan melebihi nilai ambang tertentu, director menyimpang dari orientasi awal dan menunjukkan kecenderungan untuk berorientasi tegak lurus terhadap elektroda (jika $\Delta n > 0$, seperti biasanya). Dalam hal ini, nilai rata-rata dari Δn berkurang dan pada tegangan tertentu (ambang optik efek twist), hukum Waveguide tidak berlaku. Ketika kondisi ini terjadi, maka LC bersifat sebagai media isotropik.

b. LC dan PBS sebagai Bagian dari Router

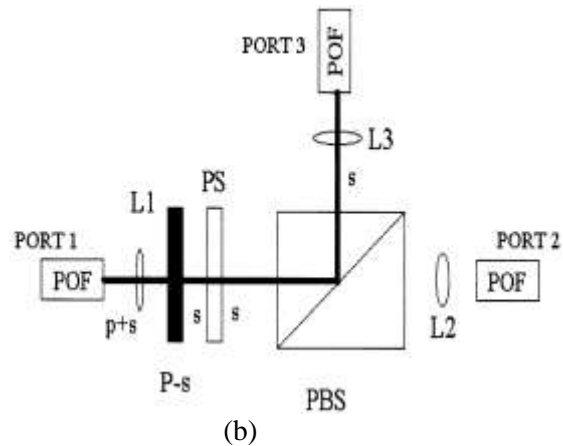
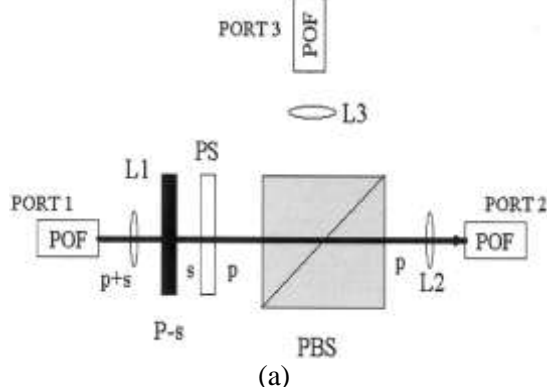
Secara umum, fungsi switching memerlukan jalur mekanisme seleksi yang dapat digunakan sebagai dengan PBS untuk memilih arah jalan output cahaya. Pada PBS, jika polarisasi cahaya adalah polarisasi horisontal, maka garis bias tidak dimodifikasi keluar dari PBS melainkan dengan arah yang sama [lihat Gambar.1(a)]. Jika input cahaya mempunyai bentuk

polarisasi vertikal, maka sinar dibelokkan 90°, tergantung pada permukaan kubus yang digunakan [lihat Gambar. 1 (b)]. Dalam perangkat ini, jika kita mengontrol bentuk polarisasi cahaya yang masukan dan jatuh di PBS, maka kita dapat mengontrol jalan yang dipilih oleh output berkas cahaya.

Seperti yang disebutkan sebelumnya, sebuah sel nematic LC yang dibelokkan dengan polarisasi tunggal di depan sel LC (untuk memastikan berkas cahaya terpolarisasi linier) dapat memenuhi kondisi tersebut. Dengan tidak adanya tegangan listrik, masukan kutub mempunyai polarisasi sekitar 90° [situasi yang ditunjukkan pada Gambar. 1 (a)]. Namun, jika tegangan yang cukup diterapkan ke sel LC, twist direktur LC dihapuskan dan cahaya ditransmisikan tanpa perubahan [nagaranya polarisasi lihat Gambar. 1 (b)].

Untuk menghilangkan cahaya yang ditransmisikan dengan bentuk polarisasi ellips, sel LC harus beroperasi pada hukum Mauguin's. Karena kita telah menggunakan campuran LC komersial (E7, BDH) dengan birefringence dari $\Delta n = 0,23$ pada $\lambda = 500$ nm, dan ketebalan $d = 20$ m, maka kita bisa membuat asumsi bahwa kondisi tersebut terpenuhi.

PBS adalah *Beam Splitter* kubus 03PBB003 dari Griot Melles yang beroperasi antara 450 sampai 680 nm yang mentransmisikan cahaya dengan p-terpolarisasi dan pantulan cahaya s-terpolarisasi > 95%.



Gambar 1. Skema optik router.

(a) CH1 ON, LC tidak aktif; (b) CH2 ON, LC aktif.

c. Splitter Fiber Optik dan Lensa

Lensa digunakan untuk input cahaya collimate dan untuk memfokuskan cahaya output. Jenis lensa yang digunakan sebagai berikut:

Input: $\phi = 25, 5$ mm $f = 25$ mm, lensa cembung ganda.

Output: $\phi = 5$ mm $f = 5, 5$ mm, lensa cembung-plano.

Pada port output, ada dua splitter POF yang digunakan untuk memantau kekuatan output dari kedua saluran. Dengan output 90/10 splitter POF 91 102TK0PP901 dari Ratioplast.

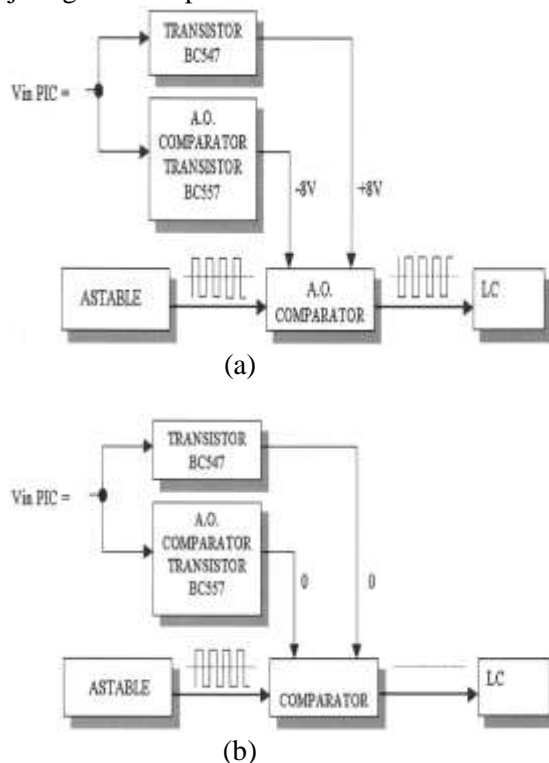
d. Bagian Elektronik

Bagian elektronik memiliki blok analog dan digital. Blok analog memiliki optik untuk konversi listrik (OE) dan osilator untuk merangsang liquid crystal. Transimpedance amplifier dengan penguat operasional LM124 (OA) dan phototransistor SFH350 digunakan dalam konversi OE. SFH350 ini sensitif dalam terlihat dan kisaran IR dekat dengan linieritas yang baik dan memiliki aperture 2,2-mm, yang memegang standar 1000- μ plastic fiber.

Sebuah generator gelombang persegi (multivibrator astabil) dengan frekuensi beresilasi 7,2-kHz dan 1 amplitudo 5-Vpp adalah mengimplementasikan menggunakan OA TL081 dan 3, kapasitor 3-nF. Ada juga sebuah saklar untuk membangkitkan atau tidak untuk merangsang kristal cair dengan osilator. Ini dibuat dengan TL081 dalam

konfigurasi pembanding terbalik dengan tegangan $V_{supplied}$ 8 dan menggunakan NPN dan PNP bipolar transistor sebagai saklar positif dan tegangan yang diberikan negatif, masing-masing. Sinyal kontrol berasal dari blok digital. Ini adalah salah satu pin output dari Mikrokontroler PIC16F877A dari *Microchip*. Skema dari unsur-unsur yang berbeda dari osilator gelombang persegi, tergantung pada apakah LC didorong atau tidak, ditunjukkan pada Gambar. 2. Ada juga tiga set dua LED untuk menunjukkan keadaan dari saluran yang berbeda (CH1 dan CH2) dan keadaan input dan pasokan daya $\pm 8V$.

Di sisi lain, blok digital termasuk microcontroller PIC16F877A; yang memiliki konverter 10-bit internal AD dengan delapan saluran masukan. Hal ini dapat beroperasi sampai dengan 20 MHz dan dalam modus mati. Ini adalah unit kontrol dari sistem, mengkonversi data dari amplifier transimpedansi dan mengambil tindakan yang diperlukan tergantung pada nilai yang terukur. Hal ini juga mengendalikan blok LED, *Osilator* yang membangkitkan *Liquid Crystal* dan LCD yang menunjukkan kekuatan optik di setiap saluran. Ada juga menu konfigurasi dan jaringan revisi pada LCD.



Gambar 2. Diagram sistem generator square-wave

(a) Penggerak LC; (b) LC tidak aktif

3. SISTEM OPERASI

Sistem operasi yang didasarkan pada kemampuan routing sinyal optik tergantung pada bentuk polarisasinya. Input cahaya optik, berasal dari fiber optik, lalu mengubah bentuk polarisasinya sehingga polarisasi yang digunakan dapat membangkitkan polarisasi tertentu [dalam desain, polarisasi vertikal (lihat Gambar.1)]. Sel LC dapat atau tidak menyebabkan perubahan polarisasi tergantung pada sinyal listrik yang membangkitkan *Liquid Crystal* (lihat di bawah). Dengan cara ini, akan memiliki dua bentuk polarisasi yang dapat dikontrol secara elektrik. Terakhir, perangkat ini harus mengalihkan cahaya ke salah satu output, untuk melakukannya digunakan sebuah PBS. Jika sel LC tidak dibangkitkan, garis routing tidak dimodifikasi keluar dari dalam PBS pada arah yang sama [lihat Gambar. 1(a)]. Jika sel LC elektronik dibangkitkan, sinar dialihkan 90° [lihat Gambar. 1(b)]. Dua foto dari perangkat yang diterapkan ditunjukkan pada Gambar. 3; bagian atas dan menunjukkan telak bagian lateral elektronik dan splitter POF.

Di sisi lain, fungsi utama dari bagian elektronik menghasilkan dan mengendalikan sinyal listrik yang membangkitkan *Liquid Crystal*. Fungsi lain dari elektronik adalah mengukur daya keluaran optik setiap saluran, menunjukkan berbeda dalam formasi pada LCD, aktivasi alarm, dan secara otomatis memeriksa dan pemilihan saluran kerja.

Sebuah fraksi daya keluaran setiap saluran dari *Splitter* POF passive, diukur dan disimpan dalam PIC. Hanya sebuah saluran yang diukur setiap kali. Informasi ini ditampilkan pada LCD bersama dengan saluran lain, yaitu saluran yang sedang bekerja. Ada juga kemungkinan untuk akses ke menu LCD internal dengan pilihan sebagai berikut.

- 1) Potencia CANAL 1: menunjukkan daya optik di CHANNEL 1 (CH1).
- 2) Potencia CANAL2 : menunjukkan daya optik di CHANNEL 2 (CH2).
- 3) Cambiar CANAL: untuk merubah channel output.
- 4) Conmutar Canales: auto-mode pengujian, perubahan konstan dalam saluran output yang dikembangkan,

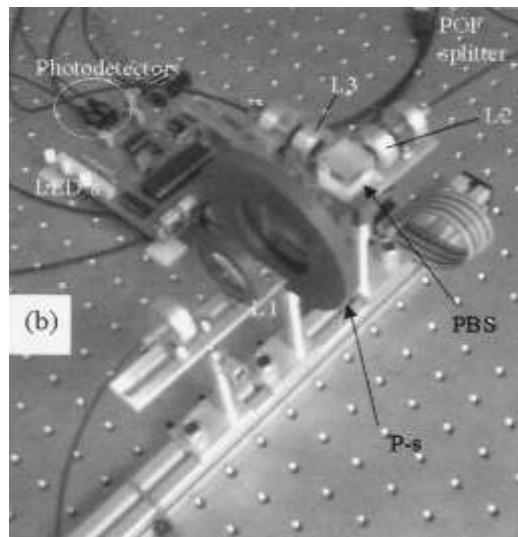
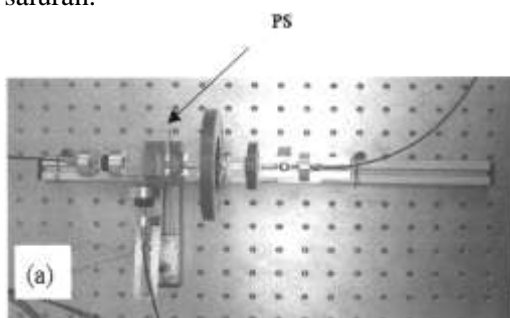
menunjukkan daya keluaran dalam posisi setiap channel untuk memastikan bahwa perangkat dan jaringan bekerja.

5) EXIT: keluar dari menu.

Sebuah blok dari tiga LED dikendalikan melalui PIC, dengan pesan kode berikut.

- Input LED hijau: salah satu saluran output bekerja OK
- Input LED merah (berkedip-kedip dan dua LED merah lain): ada dua saluran tidak bekerja.
- CH1 LED hijau: kanal OK (cincin utama).
- CH1 LED merah (berkedip): bahwa saluran tidak berfungsi sebagaimana mestinya.
- CH2 LED hijau: kanal OK (cincin sekunder).
- CH2 LED merah (berkedip): bahwa saluran tidak berfungsi sebagaimana mestinya.

Generator gelombang persegi membangkitkan liquid crystal untuk memilih saluran output kerja. PIC 16F877A bertanggung jawab untuk mengendalikan sinyal dan selalu mengamankan saluran komunikasi kerja. Jika PIC mendeteksi level daya optik bawah nilai yang telah ditentukan (dalam pengembangan sekarang ini besarnya tetap yaitu 12 dBm), PIC akan mengirim perintah untuk mengaktifkan liquid crystal dan melakukan perubahan saluran.



Gambar 3. Fotografi dari perangkat

(a) Tampak Atas. (b) Tampak bawah termasuk bagian elektronik dan Splitter POF

Tabel 1. Pengukuran untuk Menentukan Bentuk Polarisasi dari Cahaya Laser Semikonduktor dan Loss Polarisasi. Laser Output Power Tanpa Polarizer (Kolom 1), dengan Menggunakan Satu Polarizer dengan Orientasi yang Berbeda (Kolom 2-5) dan Dengan Menggunakan Dua Polarizer dengan Orientasi yang Berbeda (Kolom 6-9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)	P(mW)
OUTPUT POWER	2.850	0.750	0.125	0.279	1.050	0.310	0.000	0.086	0.380
FIRST POLARIZER ORIENTATION		↕	↗	↔	↖	↘	↙	↗	↖
SECOND POLARIZER ORIENTATION						↕	↗	↔	↖

4. PENGUKURAN & PEMBAHASAN

a. Sistem Parameter

Power yang stabil pada perangkat memungkinkan untuk dapat menentukan insertion losses, dengan rumus

$$\text{Optical loss} = L_{pol} + L_{cou} + L_{PBS} + L_{LC} + L_{OS}$$

Dimana L_{pol} , L_{cou} , L_{PBS} , L_{LC} dan L_{OS} masing-masing adalah optical losses karena polarisasi dalam desibel, sambungan ruang bebas dari fiber ke fiber dengan dua lensa, PBS, perangkat LC, dan pembagi POF pasif. Optical loss yang sudah diukur sebesar 11 dB dengan pembagian sebagai berikut.

$$L_{pol} = 3 \text{ dB}; L_{cou} = 6 \text{ dB}; L_{OS} = 2 \text{ dB}, L_{PBS} + L_{LC} \ll L_{pol} + L_{cou} + L_{OS}.$$

Nilai loss optik dapat dikurangi dengan memperbaiki sambungan pada optik, menggunakan pelapis anti reflektor pada polarisasi panjang gelombang dan sel-sel NLC dan menerapkan konfigurasi simetris dengan menggunakan semua daya input.

Perangkat akan membutuhkan waktu tertentu untuk beralih dari ON ke OFF. Relaksasi LC lebih lambat daripada proses sebaliknya sehingga waktu tidak simetris. Dari hasil penelitian saat-saat terburuk saklar saat pengukuran adalah sebagai berikut.

- Beralih dari CH1 ke CH2 100 ms.
- Beralih dari CH2 ke CH1 140 ms.

b. Pengujian

Berbagai macam tes telah dilakukan untuk memastikan operasi terbaik dari perangkat ini. Yang paling relevan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut.

- Perangkat dapat mengubah saluran melalui menu LCD.
- Kegagalan dari saluran utama (CH1) secara otomatis mengubah saluran kerja ke CH2 dan menampilkan pesan kegagalan tersebut pada LCD (lihat Gambar. 4).
- Power output pada setiap saluran telah diukur untuk berbagai kondisi saluran kerja.
- kode lampu LED sebagai verifikasi.

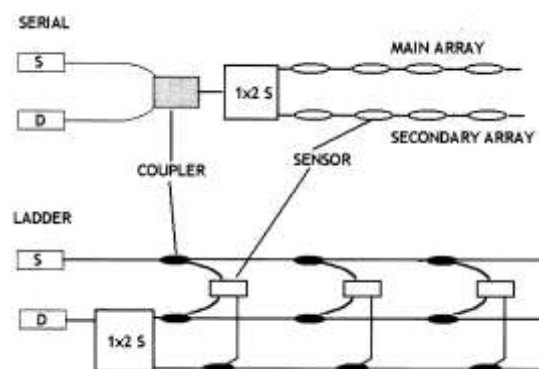


Gambar 4. Pesan LCD menampilkan output power pada saluran kerja (CH2) sedangkan (CH1) saluran yang diperbaiki

5. APLIKASI ROUTER PADA TOPOLOGI ARRAY SENSOR FIBER YANG BERBEDA

Berikut ini, akan dibahas secara singkat kemungkinan penggunaan router dalam jaringan sensor sederhana. Berbagai topologi dasar atau arsitektur jaringan untuk mengimplementasikan multiplexing atau fiber sensor arrays yang telah dikembangkan [13]. Gambar. 5 menunjukkan serial dan ladder topologi pada implementasi router termasuk untuk keperluan redundansi. Dalam topologi serial, ada dua bentuk pengukuran (atau serial array sensor) dan switch 1 x 2 dapat memilih dari mana array yang akan diukur akan diambil. Tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan keamanan sistem pengukuran tanpa menduplikasi sumber elemen detektor dan sirkuit, tetapi dapat meningkatkan kerugian pada seluruh sistem.

Dalam ladder topologi, switch 1 x 2 digunakan untuk meningkatkan keamanan dalam output fiber dari berbagai sumber sensor dan switch 1 x 2 yang lainnya dapat digunakan sebagai jalur sumber.



Gambar 5. Application of the switch (1x2S) in two basic fiber sensor array topologies

6. KESIMPULAN

Telah disajikan arsitektur router optik menggunakan nematic liquid crystals. Arsitektur ini mempunyai struktur yang sederhana yang dirancang untuk beroperasi dengan cahaya tampak dan *Plastic Optical Fiber*. Dari hasil penelitian ini pada implementasi bentuk dasarnya menunjukkan *Optical Loss* sebesar 11 dB, *Crosstalk* sebesar 14 dB, dan memerlukan 100-ms saat switching dengan konsumsi daya yang rendah. Ada perbedaan antara crosstalk dan waktu switching, yang dapat diselesaikan dengan menggunakan campuran lain dari LC. Arsitektur yang sama dapat diduplikasi di bagian optik dengan menggunakan semua daya input untuk mengurangi optical losses. Bentuk dasar arsitektur ini dirancang untuk menggunakan router dalam jaringan ring untuk meningkatkan kehandalan sistem. Jadi, sistem secara otomatis beralih dari saluran utama jika terjadi kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) E. Achaerandio, S. Jarabo, S. Abad, and M. López-Amo, "New WDM amplified network for optical sensor multiplexing," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 1644–1646, Dec. 1999.
- 2) A.D. Kersey, "Multiplexing techniques for fiber-optic sensors," in *Optical Fiber Sensors: Vol. IV: Applications, Analysis and Future Trends*, J. Daking and B. Culshaw, Eds. Boston, MA: Artech House, 1997, ch. 15.
- 3) S. Sumriddetchkajorn, N. Riza, and D. Sengupta, "Liquid crystal-based self-aligning 2_2 wavelength routing module," *Opt. Eng.*, vol. 40, no. 8, pp. 1521–1528, Aug. 2001.
- 4) S. Abad, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and M. López-Amo, "Multiplexing of fiber intensity sensors using fused biconical wavelength selective couplers," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 8, pp. 490–491, Apr. 2001.
- 5) M. S. Borella, J. P. Jue, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Optical components for WDM lightwave networks," *Proc. IEEE*, vol. 85, pp. 1274–1307, Aug. 1997.
- 6) N. A. Niza and J. Chen, "Ultra-high ≥ 47 dB optical drop rejection multi-wavelength add-dropp filter using spatial filtering and dual bulk acousto-optic tunable filters," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 945–947, June 1998.
- 7) R. A. Jensen, "Comparing of optical switching technologies for intelligent optical networks," in *Proc. LEOS*, vol. I, Nov. 2002, pp. 230–231.
- 8) N. A. Riza, "High-optical isolation low-loss moderate-switching-speed nematic liquid crystal optical switch," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1780–1782, 1994.
- 9) V. A. Svirid, V. León, and S. N. Khotiaintsev, "A prototype fiber-optic discrete level sensor for liquid propane-butane," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 303–308, 2000.
- 10) C. Vázquez, J. Garcinuño, J. M. S. Pena, and A. B. Gonzalo, "Multisensor system for level measurements with optical fibers," in *Proc. 28th Annu. Conf. IEEE Industrial Electronics Society*, 2002, pp. 2657–2662.
- 11) P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2d ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1993.
- 12) P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*. New York: Wiley, 1999.
- 13) A. D. Kersey, *Fiber Optic Smart Structures*, E. Udd, Ed. New York: Wiley, 1995, ch. 15.

PENULIS :

Ir. Yamato, MT., Staf Pengajar Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik – Universitas Pakuan, Bogor